

О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ В СЛОИСТОМ ПЛАСТЕ КРУГОВОЙ ФОРМЫ

К.Н.Джалилов, Н.Д.Джафаров, М.Х.Гюльмамедов

*Институт проблем глубинных нефтегазовых месторождений
АН Азербайджана, 370143, Баку, пр. Г.Джавида, 33
gcalilov@lan.ab.az*

При разработке слоистых нефтяных пластов в случае вытеснения нефти горячей водой и ее оторочкой исследование в них температурных полей, проницаемости которых сильно отличаются друг от друга, особенно в случае закачки большого количества холодной воды, представляет самостоятельный интерес. Кроме того, в пластах, содержащих большое количество парафина в нефти, при небольшом снижении температуры происходит его выпадение. С использованием формулы Ловерье для температурного поля и с учетом влияния слоев друг на друга по аддитивности температурное поле исследовано в [2]. В работе [4] получено эффективное решение задачи о распределении температуры в однопластовой системе, на линии раздела которой соблюдены условия непрерывности потока тепла и равенства температур при переходе из одного слоя в другой. В данной работе эта же задача обобщена для случая многослойных пластов. Для простоты предполагается, что пласт состоит из пяти слоев с бесконечными окружающими средами. Принимается, что относительно среднего слоя залежь симметрична, т. е. мощности и проницаемости слоев 1; 5 и 2; 4 одинаковы. Тогда залежь будет трехслойной, окруженной с одной стороны непроницаемой границей, а с другой – бесконечной непродуктивной средой.

Распределение температуры в j -ом слое ($j=0, 1, 2, \dots, n+1$) описывается в форме следующей задачи

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_j}{\partial r} \right) - C_j \frac{\varepsilon_j v_j}{\lambda_j} \frac{\partial T_j}{\partial r} + \frac{\partial^2 (r T_j)}{\partial z^2} = \frac{C_j}{\lambda_j} \frac{\partial (r T_j)}{\partial t}, \quad (1)$$

$$T_0(r, -\infty, t) = T_{n+1}(r, \infty, t) = T_j(\infty, z, t) = T_j(r, z, 0) = T_*, \quad (2)$$

$$T_j(r, h_j, t) = T_{j+1}(r, h_j, t); \frac{\partial T_j(r, h_j, t)}{\partial z} = \frac{\lambda_{j+1}}{\lambda_j} \frac{\partial T_{j+1}(r, h_j, t)}{\partial z}, \quad (3)$$

$$T_j(0, z, t) = T_{j\text{зак}}(t); \varepsilon_0 = \varepsilon_{n+1} = 0; \varepsilon_j = 1, j = \overline{1, n}, \quad (4)$$

где $T_j(r, z, t)$, T_{nl} и $T_{зак}(t)$ – текущая, пластовая и забойная температуры; v_j , λ_j и C_j – соответственно скорость фильтрации; коэффициент теплопроводности и объемной теплоемкости; $C_{ж}$ – объемная теплоемкость горячей воды; h_j – расстояние поверхности раздела между j -м и $j+1$ -м слоями; h_n – общая мощность слоистого пласта; (r, z) – координаты произвольной точки; t – время; n – число продуктивных слоев; индексы $j=0$ и $j=n+1$ относятся к внешним непродуктивным, а $j = \overline{1, n}$ – к внутренним продуктивным полубесконечным средам.

К решению задачи (1) – (4) применяются метод интегральных соотношений и преобразование Лапласа с приближенным переходом к оригиналу [1, 3, 4]. Тогда решение задачи в безразмерных величинах будет иметь вид:

$$\theta_j(\xi, \eta, \tau) = f_j(\tau) \left\{ 1 - \left[\frac{\xi}{l_j(\eta, \tau)} \right]^2 \right\}^m; l_j(\eta, \tau) = \sqrt{\frac{2(m+1)u_j(\eta, \tau)}{f_j(\tau)}}, \quad (5)$$

где C_m^k – число сочетаний из m элементов по k элементам, причем в формуле (5)

$$0 \leq \xi \leq l_j(\eta, \tau); \quad \eta_{j-1} \leq \eta \leq \eta_j; \quad \tau > 0,$$

$$\theta_j(\xi, \eta, \tau) = \frac{T_j(\xi, \eta, \tau) - T_{nl}}{T_0 - T_{nl}}; \quad f_j(\tau) = \frac{T_{j\text{зак}}(\tau) - T_{nl}}{T_0 - T_{nl}},$$

$$\xi = \frac{r}{H}; \quad \eta = \frac{z}{H}; \quad \eta_j = \frac{h_j}{H}; \quad H = h_n; \quad \tau = \frac{t}{t_0},$$

здесь t_0 – единица измерения времени (сут.); T_0 – характерная величина для измерения температуры. Функция $u_j(\eta, \tau)$ согласно [1, 3, 4] найдено в следующем виде:

$$u_j(\eta, \tau) = \sum_{v=1}^{2N} \frac{D_{\cdot v}}{v} \{N_j(\eta, s)\}_{s=\frac{v \ln 2}{\tau}}, \quad (6)$$

где

$$D_{\nu} = (-1)^{\nu+N} \sum_{k=r(\nu)}^{R(\nu)} \frac{(2k)! k^N}{k! (k-1)! (N-k)! (\nu-k)! (2k-\nu)!},$$

$$N_j(\eta, s) = \frac{1}{2s} \left\{ 2F_j(s) + r_j \exp[\gamma_j(\eta_{j-1} - \eta)] + Q_j \exp[\gamma_j(\eta - \eta_j)] \right\},$$

$$Q_j = R_j r_j \exp[\gamma_j(\eta_{j-1} - \eta_j)] - r_j, \quad r_j = \sum_{l=1}^{j-1} (A_l Y_l),$$

$$Y_l = \begin{cases} \prod_{\alpha=l-1}^{j-1} B_{\alpha}, & l \neq j-1, \\ 1, & l = j-1, \end{cases}$$

$$A_j = a_j + b_j; \quad B_j = d_j \exp[\gamma_j(\eta_{j-1} - \eta_j)]; \quad a_j = \frac{1+\mu_j}{M_{*j}} \varphi_j,$$

$$b_j = \frac{\mu_j}{M_{*j}} r_{j+1} \exp[\gamma_{j+1}(\eta_j - \eta_{j+1})], \quad d_j = \frac{1+\mu_j}{M_{*j}},$$

$$r_j = \frac{1-\mu_j}{M_{*j}} \left\{ r_{j+1} \exp[\gamma_{j+1}(\eta_j - \eta_{j+1})] + \varphi_j (1 - R_{j+1} \exp[2\gamma_{j+1}(\eta_j - \eta_{j+1})]) \right\},$$

$$R_j = \frac{1}{M_{*j}} \left\{ \mu_j + R_{j+1} \exp[2\gamma_{j+1}(\eta_j - \eta_{j+1})] \right\}; \quad \gamma_j = \sqrt{\beta s_j},$$

$$M_{*j} = 1 + \mu_j R_{j+1} \exp[2\gamma_{j+1}(\eta_j - \eta_{j+1})]; \quad \varphi_j = F_j(s) - F_{j+1};$$

$$F_j(s) = \frac{\alpha_j \beta_{*j}}{(T_0 - T_{*n}) \beta_j}; \quad \mu_j = \frac{1-k_j}{1+k_j}; \quad k_j = \sqrt{\frac{\lambda_{j+1} C_{j+1}}{\lambda_j C_j}};$$

$$\alpha_j = \frac{C_c q_j}{2\pi H(\eta_j - \eta_{j-1})}; \quad \beta_j = \frac{H^2 C_j}{t_0 \lambda_j}; \quad q_j = \frac{H_j k_{*j} q}{\sum_{\alpha=1}^n H_{\alpha} k_{* \alpha}},$$

$$r_{n+1} = 0; \quad R_{n+1} = 0; \quad b_{*j} = s \int_0^{\infty} T_{j \text{ зак}}(\gamma) \exp(-s\gamma) d\gamma - T_{*n},$$

q, H_j и k_{*j} — соответственно суммарный расход нагнетательной скважины, мощность и проницаемость слоя; $r(\nu)$ и $R(\nu)$ — соответственно целая

часть дроби $(v+1)/2$ и минимум пары чисел (v, N) ; s – параметр преобразования Лапласа.

Используя решение (5), можно найти формулы распределения температуры для случая вытеснения оторочки горячей воды холодной.

В случае вытеснения тепловой оторочки холодной водой, температура которой $T_{j*}(\tau)$ меньше T_{n*} , формула распределения температуры принимает вид

$$\theta_{j*} = T_{n*} + [T_{зак}(\tau) - T_{n*}] \theta_j(\xi, \eta, \tau) - \sigma(\tau - \tau_*) [T_{j*}(\tau) - T_{зак}(\tau)] \theta_j(\xi, \eta, \tau - \tau_*),$$

при $T_{j*} = T_{зак}$

$$\theta_{j*}(\xi, \eta, \tau) = \theta_j(\xi, \eta, \tau) - \sigma(\tau - \tau_*) \theta_j(\xi, \eta, \tau - \tau_*),$$

где $\sigma(v) = 0$ при $v \leq 0$ и $\sigma(v) = 1$ при $v > 0$, τ_* – безразмерное время продолжительности закачки воды с температурой $T_{j*}(\tau)$.

Расчеты проведены для каждого слоя при различных объемных дебитах q_j . Толщины слоев приняты равными, а проницаемости различными. На рис. 1, 2, 3 приведены кривые распределения температуры T при $t=365$ сут. для первого, второго и третьего слоев в зависимости от координаты. Рассмотрен пример $T_{13} = 20^\circ \text{C}$, $T_{n*} = 60^\circ \text{C}$, $T_3 = 110^\circ \text{C}$, $q = 150 \text{ м}^3/\text{сут.}$, $H=10 \text{ м}$, начало закачки холодной воды $\tau_* = 90, 180, 300$ сут., для z приняты среднее значение толщины каждого слоя. Кривые с индексами 1; 1.1; 1.2; 1.3; и 2; 2.1; 2.2; 2.3; относятся к 1) $k_1 = 10k_2$; $k_3 = 2k_2$ и 2) $k_1 = 2k_2$; $k_3 = 10k_2$ ($k_2 = 0,1 \text{ мкм}^2$) (см. рис. 1, 2, 3). Кривые 1, 2 для T имеют место при непрерывной закачке горячей воды. Расчеты проведены для слоя с проницаемостью 1 дарси. На рис. 4 приведены кривые, полученные при $T_3 = 150^\circ \text{C}$ для первого слоя.

Установлено влияние забойной температуры $T_s \geq T_n$ на характер распределения температуры (до исчезновения вала горячей воды), длительности закачки горячей воды и на процесс охлаждения пласта ($T_s \geq T_n$) при различных размерах оторочки горячей воды (рис. 1, 4). Из рис. 1, 4 видно, что зона охвата горячей водой при одинаковых $T_s - T_n$ в случае $T_s = 150^\circ \text{C}$ заметно больше, чем при $T_s = 110^\circ \text{C}$.

Проницаемости слоев существенно влияют на закономерности изменения T_j и на $l_j(z, t)$, т. е. на охват зон с температурой при непрерывной закачке горячей воды и при различных размерах ее оторочки (рис. 1, 2, 3). В слабо проницаемых слоях заметно отстают границы горячей воды и выделяются неохваченные заводнением зоны. Во всех рассмотренных случаях охлаждение слоев в зависимости от их проницаемостей может привести к значительному выделению парафина из нефти и уменьшению нефтеотдачи.

Согласно второй из формул (5) с учетом равенства (6) на срединных плоскостях слоев при $t=1$ год проведены расчеты для изучения перемещения теплового фронта и распределения температуры в зависимости от времени и изменения проницаемостей слоев. Результаты расчетов представлены в таблице.

Сравнение данных таблицы и сопоставление графиков, представленных на рисунках, показывают, что технологические показатели вытеснения нефти горячей водой и оторочки горячей смеси холодной водой существенно зависят от значения и характера изменения проницаемостей слоев пласта, особенно в тех слоях, которые непосредственно имеют контакты с окружающими средами.

Из графиков видно, что в обоих случаях наблюдаются существенные зависимости между распределением температуры и проницаемости, а также между длиной тепловозмущенной зоны и проницаемостью рассматриваемого пласта. Так, например, как и следовало ожидать, в этих слоях при лучшей проницаемости названные показатели становятся высокими по сравнению с худшей проницаемостью. Что касается второго слоя, можно отметить, что в рассмотренных случаях лучшие показатели наблюдаются только тогда, когда проницаемость первого слоя больше, чем третьего, притом изменение проницаемости второго слоя в указанном интервале оказывает влияние меньшей степени.

Сравнение соответствующих графиков распределения температуры на рис. 1–3, построенных при различных временах, показывает, что большее влияние на величину температуры при прочих равных условиях оказывает местоположение рассматриваемого слоя.

Для всех графиков вытеснения оторочки горячей воды холодной при охлаждении пласта характерно существование максимума температуры. При этом в начальные моменты эти графики имеют симметричные синусообразные формы, которые постепенно исчезают с течением времени.

Полученные формулы позволяют найти теплонакопления в пласте, утечки тепла в окружающие среды.

В заключение отметим, что из найденных для слоистого пласта формул температурного поля вытекают соответствующие формулы распределения температуры в многопластовых залежах.

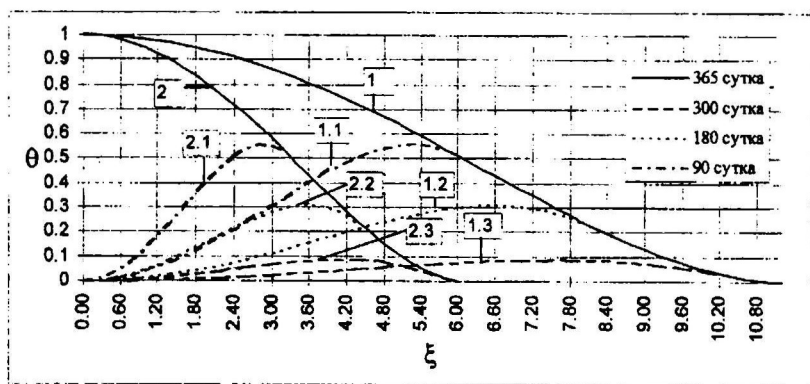


Рис. 1

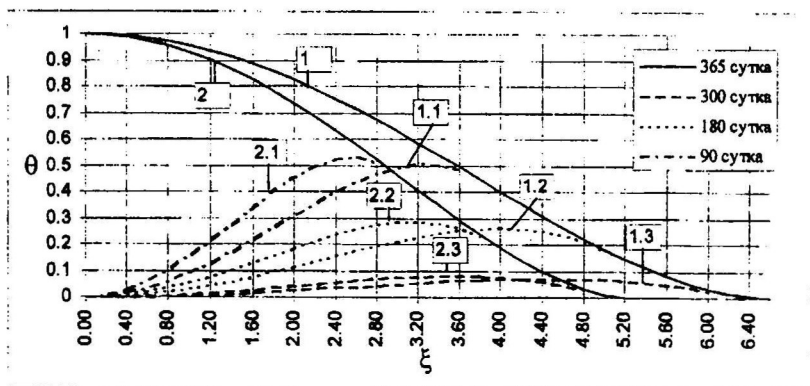


Рис. 2

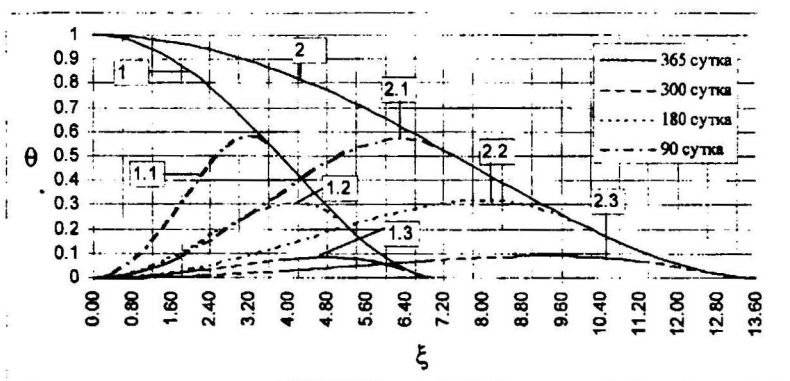


Рис. 3

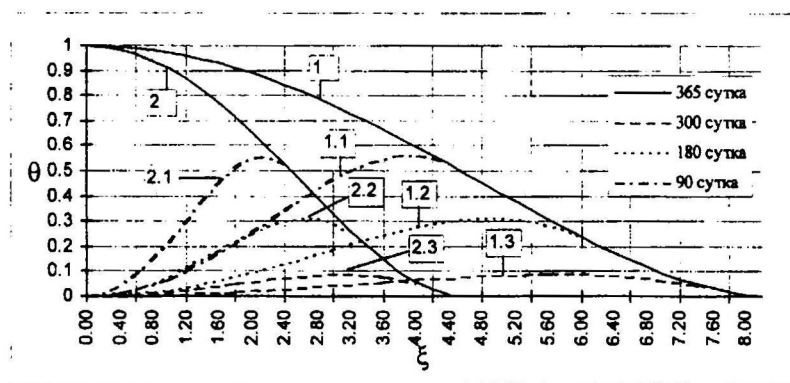


Рис. 4

Таблица

j	1			2			3		
k_j (дир.) \ τ (сут.)	365	730	1095	365	730	1095	365	730	1095
$k_1 = k_2 = k_3 = 0,2$	7,6	10,6	13,0	8,6	11,8	14,0	9,0	12,4	14,8
$k_1 = 2k_2; k_3 = 10k_2; k_2 = 0,1$	6,0	8,4	10,2	5,2	7,0	8,4	13,6	19,0	23,0
$k_1 = 10k_2; k_3 = 2k_2; k_2 = 0,1$	11,2	15,4	18,8	6,6	8,4	9,8	7,0	9,4	11,2
$k_1 = k_3 = 2k_2; k_2 = 0,1$	8,6	12,0	14,6	7,4	10,0	12,0	9,6	13,2	15,8
$k_1 = k_3 = 10k_2; k_2 = 0,1$	9,6	13,4	16,2	5,6	7,2	8,4	10,4	14,2	17,2
$k_1 = k_3 = 0,5k_2; k_2 = 1,0$	6,4	9,0	11,0	9,8	13,4	16,2	8,4	11,2	13,4
$k_1 = k_3 = 0,5k_2; k_2 = 0,2$	6,4	9,0	11,0	9,8	13,4	16,2	8,4	11,2	13,4

ЛИТЕРАТУРА

1. Абасов М.Т., Асланов М.С., Джалилов К.Н., Джафаров Н.Д. *Температурное поле в многопластовых месторождениях при термозаводнении* // Известия АН Азерб., серия наук о Земле. – 1995. – № 1–3.
2. Авдонин Н.А., Борисов Ю.П., Орлов В. С., Розенберг М.Д. *Распределение температуры в неоднородном пласте месторождения Узень*. – ВНИИ НТС № 34. – М.: Недра, 1968. – С. 133–137.
3. Асланов М.С., Джалилов К.Н., Джафаров Н.Д., Казымов Т.И. *О потерях тепла и профилях распределения температуры по разрезу в условиях многопластовых месторождений* // Известия АН Азерб., серия наук о Земле. – 1995. – № 4–6.
4. Джалилов К.Н., Кадыров Р.Н. *О распределении температуры при наличии тепловой оторочки в слоистых пластах* // Известия АН Азерб., серия наук о Земле. – 1998. – № 2.